

**ANDREA TEDESCO**

**ESTIMATIVA DE PROFUNDIDADES UTILIZANDO IMAGENS DE  
ALTA RESOLUÇÃO APOIADAS POR DADOS DE LEVANTAMENTO  
BATIMÉTRICO**

**ANDREA TEDESCO**

**ESTIMATIVA DE PROFUNDIDADES UTILIZANDO IMAGENS DE  
ALTA RESOLUÇÃO APOIADAS POR DADOS DE LEVANTAMENTO  
BATIMÉTRICO**

**Dissertação apresentada como requisito  
parcial à obtenção do grau de Mestre em  
Ciências Geodésicas, Curso de  
Pós-Graduação em Ciências Geodésicas,  
Setor de Ciências da Terra,  
Universidade Federal do Paraná.**

**Orientadores:  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cláudia Pereira Krueger  
Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno**

**Curitiba  
2003**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pela vida maravilhosa que me concedeu e por todas as oportunidades que tenho tido ao longo desta.

A meus familiares, em especial à minha mãe, meu pai, minhas irmãs, sobrinhos, e tia Ema, pelo sempre incondicional apoio e incentivo.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Jorge Centeno e Prof. Dra. Cláudia Krueger pelas contribuições e incentivo na elaboração deste trabalho.

Ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná pelo fornecimento de equipamentos e laboratórios, e aos professores do curso que vêm me ajudando a ampliar meus horizontes desde o curso de graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo apoio financeiro, através da concessão da bolsa de estudo.

Ao comandante Felix da Divisão de Levantamentos da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, pelo esclarecimento de dúvidas e pelas informações cedidas.

Aos srs. Nilton, Paulo e Carlos Trindade Gomes, do Iate Clube de Caiobá, pelo apoio logístico imprescindível à elaboração deste trabalho.

Ao sr. Laurent da empresa EngeSat Imagens de Satélite, pelo fornecimento de dados de calibração radiométrica referentes às imagens IKONOS.

Ao sr. Itamar do Iate Clube de Guaratuba e à administração da companhia responsável pela travessia do ferry boat de Guaratuba - F. Andreis, por terem permitido o uso de suas instalações para realização deste trabalho.

À APPA (Associação dos Portos de Paranaguá e Antonina) pela cessão da régua maregráfica.

Ao barqueiro e amigo Hamilton, por ter conduzido com tanta destreza a embarcação durante o levantamento batimétrico.

Aos colegas Cláudia Saraiva, Diana, Elaine, Jaime, Kaleb, Maurício Sejas, Moisés, Reginaldo, Rogério, Wilson e Wilson Soares, que me ajudaram na execução deste trabalho, inclusive e principalmente nos levantamentos de campo, ou dedicando parte de seu tempo em discussões pertinentes ao assunto ou para esclarecerem minhas dúvidas.

Às minhas queridas amigas Andrea Faria, Divimari, Eliana, Kátia, Lilian, Madalena e Tatyana pelo apoio, incentivo, amizade e palavras reconfortantes nas horas em que mais precisei.

Agradeço ainda, e em especial, aos amigos Christiane e Geraldo por serem muito mais que amigos, serem verdadeiros irmãos, para todas as horas, em todos os desafios. Agradeço pelo simples fato de vocês existirem em minha vida.

É difícil dizer o que é impossível pois,  
a fantasia de ontem é a esperança de hoje  
e a realidade de amanhã.

Embora ninguém possa voltar atrás e  
fazer um novo começo, qualquer um pode  
começar agora e fazer um novo fim.

Autores Desconhecidos

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>x</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>04</b>
2.1 LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS.....	04
2.1.1 Definições.....	04
2.1.2 Ordens de Levantamentos Hidrográficos.....	05
2.1.3 Escala do Levantamento e Densidade de Sondagem.....	07
2.1.4 Intervalo entre as Posições.....	09
2.1.5 Posicionamento.....	09
2.1.6 Marés e Níveis de Redução.....	10
2.1.7 Programa para Levantamentos Hidrográficos - HYPACK.....	13
2.1.8 Obtenção de Profundidades.....	14
2.1.8.1 Ecobatímetros.....	14
2.2 SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (NAVSTAR-GPS).....	17
2.2.1 Fundamentos.....	17
2.2.2 Métodos de Posicionamento.....	19
2.2.3 GPS Diferencial - DGPS.....	23
2.2.4 Inovações no Sistema GPS.....	25
2.3 SENSORIAMENTO REMOTO.....	28
2.3.1 Definições e Fundamentos.....	28
2.3.2 A Imagem Digital.....	31
2.3.3 Sistema IKONOS II.....	32
2.3.4 Comportamento Espectral de Alvos.....	36
2.3.5 Comportamento Espectral da Água.....	39
2.3.6 Georeferenciamento de Imagens.....	43

2.3.7 Estimativa de Profundidades através de Valores de Reflectância.....	45
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	51
3.2 IMPLANTAÇÃO DA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	55
3.3 DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE APOIO PARA GEOREFERENCIAMENTO DA IMAGEM.....	56
3.4 PLANEJAMENTO DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO.....	58
3.5 EXECUÇÃO DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO.....	59
3.6 VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO.....	65
3.7 IMPLANTAÇÃO DA RÉGUA MAREGRÁFICA.....	66
3.8 REDUÇÕES MAREGRÁFICAS.....	67
3.9 ESTIMATIVA DE PROFUNDIDADES A PARTIR DE VALORES DIGITAIS.....	68
3.10 GERAÇÃO DO MAPA BATIMÉTRICO.....	72
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>73</b>
4.1 COORDENADAS DA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	73
4.2 GEOREFERENCIAMENTO DA IMAGEM.....	73
4.3 LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO.....	75
4.4 RÉGUA MAREGRÁFICA.....	76
4.5 VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO.....	77
4.6 GERAÇÃO DO MAPA BATIMÉTRICO.....	78
4.7 APLICAÇÃO DO MODELO DE REGRESSÃO.....	81
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>98</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	98
5.2 RECOMENDAÇÕES.....	100
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>101</b>
<b>DOCUMENTOS CONSULTADOS.....</b>	<b>104</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - SISTEMAS DE LINHAS DE SONDAGEM.....	08
FIGURA 2 - PLANOS DE REFERÊNCIAS DE MARÉS.....	12
FIGURA 3 - DEFINIÇÕES DE PROFUNDIDADES.....	12
FIGURA 4 - PRINCÍPIO DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO COM O GPS.....	18
FIGURA 5 - ORGANOGRAMA SIMPLIFICADO DOS MÉTODOS E TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO GPS.....	20
FIGURA 6 - MÉTODO DE POSICIONAMENTO DGPS. ....	24
FIGURA 7 - PROCESSO DE AQUISIÇÃO DOS DADOS PELOS SENSORES REMOTOS. ....	29
FIGURA 8 - FENÔMENO DA REFLEXÃO ESPECULAR.....	37
FIGURA 9 - FENÔMENO DA REFLEXÃO DIFUSA.....	37
FIGURA 10 - FENÔMENO DA REFRAÇÃO.....	38
FIGURA 11 - CURVAS TÍPICAS DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DA ÁGUA, SOLO E VEGETAÇÃO.....	39
FIGURA 12 - CURVA DE ABSORTÂNCIA DA ÁGUA.....	41
FIGURA 13 - CURVA DE TRANSMITÂNCIA DA ÁGUA.....	42
FIGURA 14 - RECEPTOR ASHTECH ZXII.....	52
FIGURA 15 - RÉGUA MAREGRÁFICA.....	52
FIGURA 16 - ECOBATÍMETRO E TRANSDUTOR.....	53
FIGURA 17 - LOCALIZAÇÃO DA BAÍA DE GUARATUBA NO LITORAL PARANAENSE .....	54
FIGURA 18 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO - IMAGEM IKONOS. ....	54
FIGURA 18 - CARTA NÁUTICA DA ÁREA DE ESTUDO.. ....	55
FIGURA 20 - LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	56
FIGURA 21 - DISPOSIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO - IMAGEM IKONOS.....	57
FIGURA 22 - DISPOSIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO.....	57
FIGURA 23- PLACA PARA CALIBRAÇÃO DO ECOBATÍMETRO.....	60
FIGURA 24 - CALIBRAÇÃO DO ECOBATÍMETRO. ....	60
FIGURA 25 - LINHAS DE SONDAGEM PLANEJADAS... ..	61
FIGURA 26 - EQUIPAMENTOS INSTALADOS NA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA... ..	62
FIGURA 27 - ESTAÇÃO MÓVEL.....	63
FIGURA 28 - ESQUEMA DE MONTAGEM DO TRANSDUTOR E DA ANTENA GPS NA ESTAÇÃO MÓVEL.....	64
FIGURA 29 - VISUALIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DA EMBARCAÇÃO NO SOFTWARE HYPACK.. ....	65
FIGURA 30 - PONTOS DE VERIFICAÇÃO DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO.....	66
FIGURA 31 - POSICIONAMENTO DA RÉGUA MAREGRÁFICA - COORDENADAS EM UTM.....	67
FIGURA 32 - REGIÃO DE ONDAS NA IMAGEM.....	68
FIGURA 33 - COMPORTAMENTO DOS DADOS ESPECTRAIS EM RELAÇÃO À PROFUNDIDADE - PERFIL I / BLOCO I.....	70
FIGURA 34 - LINHAS DE SONDAGEM EXECUTADAS. ....	76
FIGURA 35 - INFORMAÇÕES BATIMÉTRICAS. ....	79
FIGURA 36 - MODELO DIGITAL DO TERRENO.....	80
FIGURA 37 - REGRESSÕES OBTIDAS COM O MODELO LINEAR PARA PROFUNDIDADES A PARTIR DE 30cm.. ....	82
FIGURA 38 - GRÁFICO COMPARATIVO DE PROFUNDIDADES VERDADEIRAS E ESTIMADAS PARA INTERVALO DE 0,30m A 1,53m....	85
FIGURA 39 - GRÁFICO COMPARATIVO DE PROFUNDIDADES VERDADEIRAS E ESTIMADAS PARA INTERVALO DE 0,30m A 4,97m .....	85
FIGURA 40 - GRÁFICO COMPARATIVO DE PROFUNDIDADES VERDADEIRAS E ESTIMADAS PARA INTERVALO DE 0,60m A 1,53m....	86
FIGURA 41 - GRÁFICO COMPARATIVO DE PROFUNDIDADES VERDADEIRAS E ESTIMADAS PARA INTERVALO DE 0,60m A 4,97m .....	87
FIGURA 42 - GRÁFICO COMPARATIVO DE PROFUNDIDADES VERDADEIRAS E ESTIMADAS PARA INTERVALO DE 0,60m A 3,01m.. ....	88



FIGURA 43 - COMPORTAMENTO DOS ERROS PARA INTERVALO DE 0,30m A 1,53m.....	89
FIGURA 44 - COMPORTAMENTO DOS ERROS PARA INTERVALO DE 0,30m A 4,97m.....	89
FIGURA 45 - COMPORTAMENTO DOS ERROS PARA INTERVALO DE 0,60m A 3,01m.....	90
FIGURA 46 - COMPORTAMENTO DOS ERROS PARA INTERVALO DE 0,60m A 2,51m.....	91
FIGURA 47- COMPORTAMENTO DOS ERROS PARA INTERVALO DE 0,60m A 3,48m.....	91
FIGURA 48- COMPORTAMENTO DOS ERROS PARA EXTRAPOLAÇÃO DO MODELO.....	92
FIGURA 49 - COMPARAÇÃO ENTRE PROFUNDIDADES MEDIDAS E ESTIMADAS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO, PARA O PERFIL 2 DO BLOCO I.....	93
FIGURA 50 - COMPARAÇÃO ENTRE PROFUNDIDADES MEDIDAS E ESTIMADAS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO, PARA O PERFIL 10 DO BLOCO I.....	94
FIGURA 51 - COMPARAÇÃO ENTRE PROFUNDIDADES MEDIDAS E ESTIMADAS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO, PARA O PERFIL 21 DO BLOCO I.....	94
FIGURA 52 - ERROS OBTIDOS APÓS APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO PARA O PERFIL 2 DO BLOCO I.....	95
FIGURA 53 - ERROS OBTIDOS APÓS APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO PARA O PERFIL 10 DO BLOCO I.....	96
FIGURA 54 - ERROS OBTIDOS APÓS APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO PARA O PERFIL 21 DO BLOCO I.....	96
FIGURA 55- PORCENTAGENS DE ERROS INFERIORES A 0,25m, ENTRE 0,25m E 0,50m E ENTRE 0,50m E 1,0m PARA OS PERFIS 2, 10 E 21 DO BLOCO I.....	97

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRECISÃO NO POSICIONAMENTO ABSOLUTO.....	20
TABELA 2 - PRECISÕES PARA POSICIONAMENTO RELATIVO ESTÁTICO CLÁSSICO E RÁPIDO.....	22
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DO SATÉLITE IKONOS II.....	32
TABELA 4 - NÍVEIS DE PRODUTOS IKONOS.....	36
TABELA 5 - ERROS NAS PROFUNDIDADES ESTIMADAS ATRAVÉS DOS MÉTODOS DE POLCYN, BROWN E SATTINGER E O DE LYZENGA.....	48
TABELA 6 - ERROS OBTIDOS PARA O MODELO DE REGRESSÃO.....	49
TABELA 7 - INTERVALOS DE PROFUNDIDADES.....	72
TABELA 8 - COORDENADAS GEOGRÁFICAS DA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	73
TABELA 9 - COORDENADAS GEOGRÁFICAS DOS PONTOS DE APOIO PARA GEOREFERENCIAMENTO DA IMAGEM .....	74
TABELA 10 - ERROS DOS PONTOS DE APOIO APÓS GEOREFERENCIAMENTO.....	75
TABELA 11 - OBSERVAÇÕES DE MARÉ. - 12/06/2002. ....	77
TABELA 12 - VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO.....	78
TABELA 13 - PARÂMETROS CALCULADOS DO MODELO DE CORRELAÇÃO.....	81
TABELA 14 - ERROS OBTIDOS APÓS APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.. ....	83
TABELA 15 - EQUIVALÊNCIA DOS VALORES DE PROFUNDIDADE PARA OS INTERVALOS ESTABELECIDOS....	84

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AII	- Accuracy Improvement Initiative
AS	- Anti Spoofing
BM	- Baixa-mar
C/A	- Coarse Acquisition
CAPES	- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CE	- Circular Error
CHM	- Centro de Hidrografia da Marinha
DGPS	- Differential Global Positioning System
DHN	- Diretoria de Hidrografia e Navegação
DN	- Digital Number
DoD	- Department of Defense
DTM	- Digital Terrain Model
ERS	- European Remote Sensing Satellite
GSD	- Ground Sample Distance
IFOV	- Instantaneous Field of View
IRS	- Indian Remote Sensing
LE	- Linear Error
LH	- Levantamento Hidrográfico
MBES	- Multi Beam Echo-Sounder
MCS	- Master Control Station
MHW	- Mean High Water
MHWN	- Mean High Water Neaps
MHWS	- Mean High Water Springs
MLW	- Mean Low Water
MLWN	- Mean Low Water Neaps
MLWS	- Mean Low Water Springs
NAVSTAR-GPS	- Navigation System with Time and Ranging-Global Positioning System
NIMA	- National Imagery and Mapping Agency
NM	- Nível Médio do Mar
NMEA	- National Maritime Electronics Association
NR	- Nível de Redução
P	- Código Precise ou Protected
PM	- Preamar
PPS	- Precise Positioning Service
RBMC	- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RMS	- Root Mean Square
RTCM	- Radio Technical Committee for Marine Service
SA	- Selective Availability
SBS	- Single Beam Echo-Sounder
SD	- Selective Denial
SPS	- Standard Positioning Service
SSS	- Side Scan Sonar
US NMAS	- US National Map Accuracy Standard
WGS-84	- World Geodetic System - 1984

## **RESUMO**

Analisando-se imagens de alta resolução espacial e radiométrica, provenientes do satélite IKONOS, percebeu-se uma correlação entre a profundidade e a resposta espectral dos corpos d'água. À medida em que aumenta a profundidade, diminui a resposta espectral registrada pelo sensor do satélite, em virtude da alta absorção da energia eletromagnética pelos corpos d'água. Em função disso, propôs-se um método alternativo para estimativa de profundidades e, conseqüentemente, para atualização e complementação de mapas batimétricos, através da integração de dados espectrais provenientes de imagens IKONOS e dados batimétricos. Experimentos foram realizados para a região do canal localizado entre as ilhas Sepultura e do Capinzal, na Baía de Guaratuba, litoral paranaense. Dados de profundidade foram coletados em junho de 2002, através de levantamento batimétrico utilizando-se ecobatímetro de feixe único e posicionamento horizontal através do DGPS. Com base nestes dados, analisou-se o comportamento dos valores digitais na imagem em função da profundidade e elaborou-se um modelo matemático para estimativa de profundidades em função de valores digitais. O modelo foi então aplicado à imagem e avaliações da precisão alcançada foram realizadas, sendo que o modelo proposto mostrou-se eficiente para estimativas de profundidades até 3,0m, apresentando erros na estimativa inferiores a 0,50m.

## **ABSTRACT**

Through higher spatial and radiometric images analyses, deriving from IKONOS satellite, was possible to identify a correlation between bodies water depths and spectral response. When depth increase, spectral response decrease, because of water higher electromagnetic energy absorption. So, we propose an alternative method to estimate depths and, consequently, to update and to complement bathymetric charts, through bathymetric and spectral data integration. Experiments were performed in a stream located between Sepulture and Capinzal Islands, Guaratuba Bay, Paraná coast. Depth data were collected using and single beam echo sounder and the horizontal positioning was performed by DGPS. With these data, a mathematical model was elaborated to estimate depths through digital numbers. The model was applied to image and precision evaluations were performed. The proposed model was efficient to estimate depths until 3,0m, showing errors inferiors to 0,50m.